

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420447

研究課題名(和文) 上肢のリハビリ支援を目指す二関節筋ロボットのバイラテラル・学習制御に関する研究

研究課題名(英文) Bilateral Control and Iterative Learning Control for Two-degree-of-freedom Robot Manipulators with Antagonistic Bi-articular Muscles

研究代表者

村尾 俊幸 (Muraio, Toshiyuki)

金沢工業大学・基礎教育部・講師

研究者番号：00447038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では遠隔環境で行うリハビリ支援を目指した二関節筋構造モデルを用いたロボットの学習制御とバイラテラル制御を提案した。はじめに、二関節筋ロボットのマニピュレータダイナミクスが受動性を持つようにモデリングした。つぎに、二関節筋マニピュレータシステムを受動システムとさせたことを利用することで、制御目的を満足するような制御系設計を行った。二関節筋マニピュレータシステムを設計し、学習制御に対して検証実験を行い、制御則の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This paper investigates iterative learning control and bilateral control based on passivity for two-degree-of-freedom (2DOF) robot manipulators with antagonistic bi-articular muscles. Firstly, dynamics of 2DOF robot manipulators with antagonistic bi-articular muscles is presented to satisfy a passivity property. Next, we design feedback controls for the bi-articular manipulator based on the passivity. Finally, simulation and experimental results are presented in order to confirm the effectiveness of the proposed iterative learning control law.

研究分野：ロボット制御

キーワード：制御工学 学習制御 二関節筋 バイラテラル制御 機械力学・制御

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットが産業用として普及し始めてから半世紀近く経ち、現在ではより人々の生活環境に密接した環境へのロボットの適用が期待されるようになってきている。また、医療やリハビリ、家事など日常生活により身近なところへ活躍の場が広がっていくにしたがい、ロボットの性能以上に、ロボットに直に接する人々への安全面を考慮する必要性が増してきている。このような背景のもと、近年世界中で毎年約500万人が脳卒中により何らかの後遺症に苦しめられており、脳卒中の影響で片麻痺に陥った患者に対するリハビリ支援ロボットが研究され始めている。片麻痺患者に対する上肢機能の改善のためにはリーチング動作を段階的に習得させることが有効であることが臨床の現場で確認されており、このリハビリ支援ロボットは患者がリーチング運動を行う際に補助する役目を担う。しかし、リハビリ支援ロボットは人間が持つ筋モデル構造に基づいているわけではないため、リーチング運動を支援する際に人が補助する場合の出力特性とロボットが補助する場合の出力特性が異なってしまうことから様々な問題が生じてしまうことを理学療法士が指摘している。また、増え続ける脳卒中患者に対して、理学療法士が全ての地域の患者に対応することは難しく、僻地や離島などにおける地域格差の是正を目的とした遠隔医療に対する研究をリハビリ現場においても取り入れる必要性が生じている。

### 2. 研究の目的

本研究は、遠隔環境で行うリハビリ支援を目指した二関節筋構造モデルを用いたロボットのバイラテラル制御と学習制御を提案することを目的とする。二関節筋とは、人間が上肢と下肢に有している、二つの関節にまたがって動作することで両関節に同時に作用する特徴を持つ筋肉のことである。この二関節筋構造モデルをロボットへ導入すると、人間に近い運動特性が実現可能になるだけでなく、各関節が一つのモータと両関節につながったモータの二つにより協調して制御されることから一つ一つのモータに対する出力を抑えることが可能となり安全性が増すメリットがある。申請者は従来研究で、二関節筋構造ロボットの運動制御に対する安定化制御則を提案している。

一方、遠隔環境でリハビリ支援を行うとなると、(i)理学療法士の遠隔リーチング理学療法と(ii)患者が一人で行う繰り返しリーチ

ング作業療法の二つの療法を支援できることが特に重要となる。(i)においては、普段は理学療法士が患者の手を取り行うリーチング理学療法を、遠隔地にいる患者に対して行わなければならない。そのため、二台の二関節筋ロボットを用いたバイラテラル制御を提案する。制御則には患者の状態を測るための力のフィードバックを陽に組み込み、通信環境下における時間遅れの問題に対しても安定となるように制御則を提案する。また、リハビリ分野へ適用することを考慮すると、心のケアの観点からも遠隔地にいることを感じさせないようにすることは非常に重要な問題となるため、安定性だけでなく機構透明性を高めた制御手法を確立する。さらに、(ii)に対する学習制御則も提案する。患者が一人で訓練するときには、理学療法士が以前に行った二関節筋ロボットの運動を目標値として記憶させ、リーチング運動を補助するロボットがその目標値に追従するような制御入力トルクを設計すれば良い。しかし、患者の状態は疲労や痙性等によって異なるため、必要なロボットのトルクもその時の状態により変化する。そこで、リーチング動作を繰り返す中でその時の患者の状態に適したロボットの制御出力を設計できるような、二関節筋ロボットに対する繰り返し学習制御則を提案する。本研究は二関節筋ロボットの運動制御とロボットのバイラテラル制御や学習制御を統合した内容となる。従来のバイラテラル制御や学習制御に比べ、各モータの出力を抑えられることから安全面での向上が期待される。また、人間の腕を模したロボットモデルに基づいた制御手法となるために人間の腕の出力特性と同じ特性を持たせることが可能であり、人間が自然に力を出せる方向にロボットを動かしやすいことから患者と理学療法士が共にメリットを受けることができる。本研究は、二関節筋ロボットシステムが有する受動性という性質を保存したままシステムを構成することで、安定性を保証した制御則を提案する。提案する制御則は、二関節筋構造を有するロボットシステムによる実験を通して、設計法の性能評価および有効性の検証を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、はじめに二関節筋構造を有するロボットの学習制御を提案する。つぎに、二関節筋構造を有するロボットのバイラテラル制御に関する研究を行う。それぞれの制御則は下記の方法で提案した。

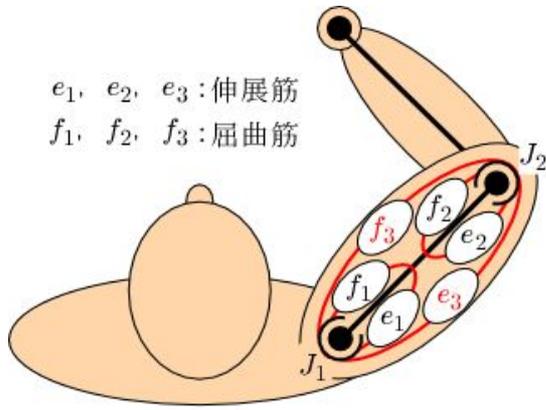


Fig. 1 上肢の二関節筋モデル

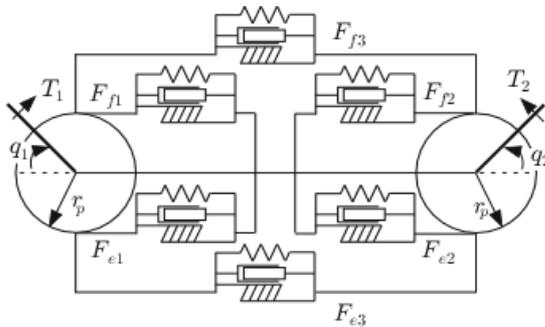


Fig. 2 二関節筋粘弾性モデル

はじめに対象とするシステムに対して、数学的にモデリングすることから始める．特に本手法では、二関節筋ロボットのマニピュレータダイナミクスが受動性を持つようにモデリングする．つぎに制御目的を設定し、その制御目的を満足するような制御系設計を行う．制御則はモデリングした二関節筋マニピュレータシステムを受動システムとさせたことを上手く利用し、リアプノフの安定定理に基づく安定性解析を行う．提案する制御則の有効性を検証するために、計算用のソフトウェアである MATLAB と Simulink を用いてシミュレーションを行う．さらに、二関節筋マニピュレータを製作し、提案する手法の実機による検証を行う．特に実装する際には、シミュレーションでの理論値との比較の他、理想的な環境に遠い状況でも有効かという視点から制御則の評価を行い、生じる問題に対する解決策も検討する．

#### 4. 研究成果

##### (1) 二関節筋構造を有するロボットに対する学習制御

繰り返しリーチング作業を介した上肢のリハビリ支援を目指し、二関節筋構造を有するロボットに対する学習制御に対する研究を行った．

はじめに、二関節筋ロボットを数学的にモデリングした．二関節筋ロボットは Fig. 1 に示すような上肢の二関節筋モデルを有する構造とし、二関節筋ロボットのマニピュレータダイナミクスをオイラー・ラグランジュシステムとして捉えたモデリングを行った．よ

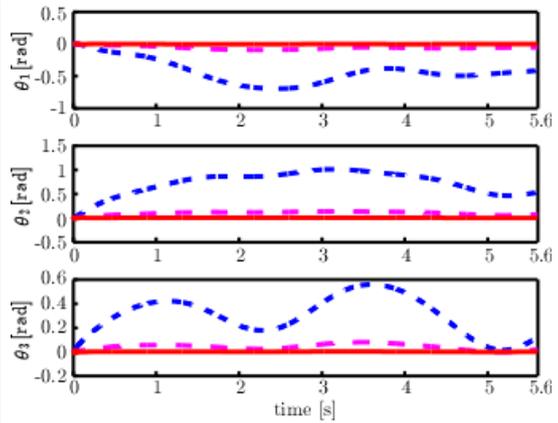


Fig. 3 角度偏差 (点線: 試行1回目, 破線: 試行5回目, 実線: 試行12回目)

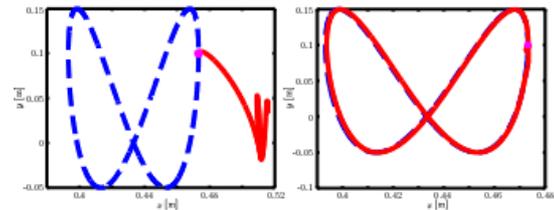


Fig. 4 二関節筋マニピュレータの手先軌道 (破線: 目標値, 実線: 数値実験結果, 左図: 試行1回目, 右図: 試行12回目)

り具体的には、Fig. 2 に示すような二関節筋粘弾性モデルに基づき、各筋肉がマス・バネ・ダンパを有しているとみなし、モデリングを行った．

つぎに、理想的な入力トルクと実際の入力トルクとの間の偏差と、角度および速度偏差に基づいたある出力との間に受動性が成立するようなロボットの入力トルクを提案した．提案した入力トルクは過去の試行を学習し、理論的に収束性を保証するものとなっている．

本研究では、実機による実験検証を行う前に、MATLAB と Simulink を用いたシミュレーション検証を行った．本シミュレーションでは、試行回数による結果の違いを検証するために、あえて完璧な制御則のゲイン調整は行わずに実施した．Figs. 3, 4 にシミュレーション結果を示す．Fig. 3 は上から 1 軸の角度、2 軸の角度、そして 1 軸と 2 軸を加えた角度の偏差をそれぞれ表している．また、点線、破線、直線の順で試行回数を増やしている．試行回数が増えるにつれ、偏差が 0 に向かっているのが分かる．それは、Fig. 4 に示した二関節筋の手先のトラジェクトリからも読み取ることができ、左に示した試行 1 回目のときの軌道は、目標値に全く追従していないが、右に示した 12 回目のシミュレーション結果では目標値にしっかりと追従していることが分かる．

数値実験の結果を受けて、実機による実験検証を行った．Fig. 5 に、製作した二関節筋構造を有するロボットシステムを示す．製作した二関節筋構造を有する平面 2 自由度ロボットマニピュレータは、収縮要素は DC モー

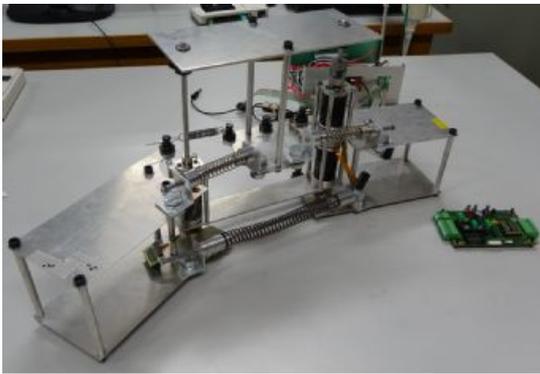


Fig. 5 製作した二関節筋マニピュレータ

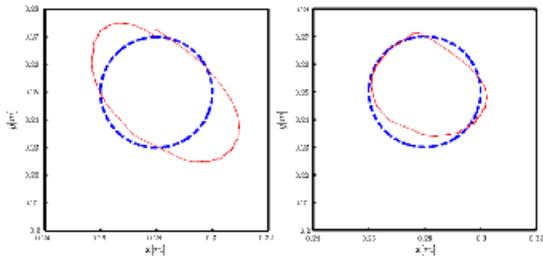


Fig. 6 二関節筋マニピュレータの手先軌道  
(破線:目標値, 実線:実験結果,  
左図:試行1回目, 右図:試行14回目)

々に、弾性要素はバネに、また粘性要素はモータに含まれるとみなしたもとなっている。実験システムは、リアルタイム処理を実現するための高速デジタル制御装置を用いて制御した。検証実験では、シミュレーション結果と同様、完璧なゲイン調整を試みなくとも、繰り返し試行回数が増えるにしたがい、目標軌道との偏差が小さくなるという実験結果が得られた (Fig. 6 参照)。したがって、提案手法の有効性を確認することができた。しかし、二関節筋構造を有さないロボットマニピュレータと同様に、モータの不感帯や摩擦の影響などにより目標軌道との偏差が少し残ってしまう結果となった。

#### (2)二関節筋構造を有するロボットに対するバイラテラル制御

Fig. 7 に示すような、遠隔環境で行うリハビリ支援を目指した二関節筋構造モデルを用いたロボットのバイラテラル制御の研究に取り組んだ。

はじめに、マスタのロボット、スレーブのロボットの両方を二関節筋マニピュレータとして捉えた遠隔操作システムを数学的にモデリングした。モデリングは、二関節筋ロボットのマニピュレータダイナミクスをオイラー・ラグランジュシステムとしてみなすことで遠隔操作システムを導出した。なお、操縦者の力の入力 は定数入力としたが、遠隔環境はバネ・ダンパシステムでモデル化される受動的なシステムを想定した。

つぎに、問題設定を行い、制御系を設計した。ロボットのバイラテラル制御は一般的に通信時間遅れを有する環境下での制御となる。本研究の二関節筋ロボットのバイラテラ

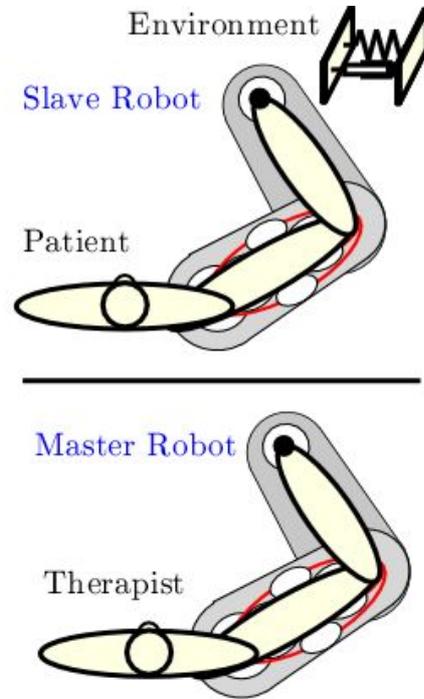


Fig. 7 二関節筋ロボットの遠隔操作制御概要図

ル制御においても時間遅れを陽に考慮した問題設定を行った。具体的には、通信路の最大往復遅延を既知の値として定義した問題設定を行った。制御則はモデリングした遠隔操作システムを受動システムとさせたことを上手く利用することで提案した。その際には、操縦者が遠隔環境との接触を直接的に感じることができるように、システムの機構透明性を強く意識した。マスタ側スレーブ側の両方が、PD 型の制御則となっている。

現在、前述の学習制御で製作した二関節筋構造を有するロボットシステム (Fig. 5 参照) を改良しつつ、ロボットのバイラテラル制御の実験検証のためのシステム構築に取り組んでいる。マスタロボットに対するスレーブロボットの追従実験を行うための、二台のロボットシステムを製作している段階であるが、今後も引き続き研究を継続していき、二関節筋構造を有するロボットのバイラテラル制御の研究に対する有効性も、実験検証を通して確認する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

1. T. Murao, H. Kawai, Y. Tsuruo and M. Fujita, Visual Motion Observer-Based Bilateral Control for Eye-in-Hand Mobile Robot Teleoperation, The 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Hyderabad, India, Aug. 29,

2013. (DOI:10.1109/CCA.2013.6662819)
2. 一条祐輔, 河合宏之, 村尾俊幸, 鈴木亮一, 二関節筋口ロボットアームのオープンループ制御, 第14回 SICE システムインテグレーション部門 講演会, 神戸, Dec. 19, 2013.
  3. Y. Ichijo, T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Passivity-Based Iterative Learning Control for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-Articular Muscles, The 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Antibes/Nice, France, Oct. 8, 2014. (DOI:10.1109/CCA.2014.6981357)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村尾 俊幸 (MURAO TOSHIYUKI)  
金沢工業大学・基礎教育部・講師  
研究者番号: 00447038

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: